

文章编号: 0258-2724(2013)03-0428-07 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2013.03.006

# 盾构隧道壁后注浆浆液毛细管渗透扩散模型

叶飞, 刘燕鹏, 苟长飞, 张金龙, 周卓

(长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为探讨盾尾注浆扩散半径及管片所受注浆压力的计算方法, 将浆液的扩散过程简化为其在土体中大量孔径不均匀的毛细管中的渗流运动, 建立了浆液渗透扩散力学模型。基于柱面扩散理论, 假定浆液为宾汉姆流体, 引入等效孔隙率替代土体初始孔隙率, 通过模拟浆液在单个毛细管中的渗透过程, 得到了考虑浆液时效性的浆液扩散半径和管片所受浆液总压力的计算式。结合具体实例, 讨论了浆液扩散半径、注浆对管片产生的压力与注浆压力和注浆时间的关系。分析结果表明: 其他注浆参数相同时, 在不同注浆压力和不同注浆时间条件下, 浆液对管片产生的压力的增长速率均大于浆液扩散半径的增长速率; 当盾尾建筑间隙影响厚度和土体等效孔隙率不变时, 浆液流动锋面上毛细管总面积与浆液扩散半径成正比。

**关键词:** 盾构隧道; 同步注浆; 宾汉姆流体; 渗透扩散; 注浆压力

**中图分类号:** U451 **文献标志码:** A

## Capillary Penetration Diffusion Model for Backfill Grouting of Shield Tunnel

YE Fei, LIU Yanpeng, GOU Changfei, ZHANG Jinlong, ZHOU Zhuo

(Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to discuss the calculating method of diffusion radius and pressure on segments of backfill grouting, a mechanical model for penetration diffusion in surrounding soils was set up by simplifying grouting penetration as transfusion in soil capillary tubes with uneven bore diameters. Based on the cylinder diffusion theory and the assumption that grout is as Bingham fluid, under the premise of bring the equivalent porosity to replace the soil porosity, the calculation formula of the diffusion radius and the pressure on segments of backfill grouting were obtained through simulating the penetration process of grout in single capillary tube. Then, the relations between grouting pressure, time, and the diffusion radius, pressure on segments were discussed through a detail example. The result shows that the increase rate of the pressure on segments is bigger than that of the grouts diffusion radius under different grouting time and pressure, and the total capillary area on the grouts flowing frontal surface is in proportion to diffusion radius when keep the influence depth of tail gap and the soil equivalent porosity unchanged.

**Key words:** shield tunnel; synchronous grouting; Bingham fluid; penetration diffusion; grouting pressure

相对于其他隧道施工工法而言, 盾构工法具有安全性好、施工速度快、劳动强度低及对环境影

小的优点<sup>[1]</sup>, 已广泛应用于城市地铁工程及水下隧道。盾构机在掘进过程中, 当管片拼装完毕并脱

收稿日期: 2012-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178052, 50808020)

作者简介: 叶飞(1977-)男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为隧道及地下工程, E-mail: xianyefei@126.com

出盾尾后,在周围土体和管片外壁之间形成约8~16 cm厚的环形盾尾间隙<sup>[2]</sup>,该间隙若不及时填充,将造成地层变形,导致地表较大沉降,并引起邻近建筑物开裂、倾斜、破坏。为减小盾尾间隙对周围土体和结构产生的不利影响,在盾构施工中,通常将具有一定流动性的浆液以一定的压力压入到盾尾间隙中,以期通过壁后注浆减小由于盾构开挖而产生的土体损失及周围土体应力释放,这个过程称为壁后注浆。

根据文献[3],盾构隧道壁后注浆单液硬性浆的水灰比为1.0~2.0,浆液流型介于牛顿流体和宾汉姆流体之间。不同流型的浆液在岩土地层中的扩散情况差别很大,为保证壁后注浆效果,需要根据实际情况选取合理的注浆参数,而合理的注浆参数需要建立在对壁后注浆机理研究的基础之上。

Yukinori等通过注浆模型试验,得出盾构隧道周围土压力受土的密实度和注浆压力影响显著的结论<sup>[4]</sup>。叶飞等引入土体等效孔隙率以考虑盾尾间隙对壁后注浆的影响,假定浆液为牛顿流体,推导了浆液扩散半径及管片所受注浆压力的计算式<sup>[2,5]</sup>。李志明等采用牛顿流体及宾汉姆流体模拟浆液在盾尾的流动,给出了盾构同步注浆环向填充及纵向填充的力学模型及计算方法<sup>[6]</sup>。韩月旺等通过模型试验研究了砂性土条件下壁后注浆体的变形规律<sup>[7]</sup>。袁小会等通过试验测定硬性浆液为宾汉姆流体,进而推导出浆液注入盾尾间隙过程中注浆压力的传递公式,得到了注浆压力传递与浆液扩散距离及注浆时间的关系<sup>[8-9]</sup>。黄宏伟等利用雷达探测的方法对浆液在壁后的分布情况进行了研究<sup>[10]</sup>。邓宗伟等采用数值模拟的方法研究了壁后注浆对支护结构和围岩的影响<sup>[11]</sup>。

在作者之前的研究<sup>[2,5]</sup>中,针对壁后注浆浆液为牛顿流体的情形,直接由H Darcy定律得到柱面扩散时浆液流量的关系式,再由边界条件并结合浆液柱面扩散的特点,得到了浆液扩散半径以及注浆对管片产生的压力的计算式。本文在前期研究的基础上,基于柱面扩散理论,考虑宾汉姆流体比牛顿流体具有较高流动阻力的力学特性,通过模拟单个毛细管中浆液的渗透过程,得到在盾尾建筑间隙影响范围内浆液渗透的力学模型,再由Dupuit-Forchheimer关系式将微观模型转化为宏观模型;然后,引入H Darcy定律,给出浆液渗透速度与渗透率的关系,在此基础上推导注浆扩散半径及管片所受注浆压力的计算式,并通过算例分析讨论了注

浆压力和注浆时间的影响。

## 1 基本假定

由于浆液在地层中往往以多种形式运动,而且这些运动形式随着地层、浆液性质和压力变化而相互转化与并存,但在一定条件下浆液总是以某种流动形式为主<sup>[5]</sup>。为研究浆液的扩散规律,假定:

- (1) 浆液为不可压缩的均质、各向同性的流体;
- (2) 在壁后注浆过程中,浆液的流动属于恒定层流;
- (3) 浆液表现为宾汉姆流特性,且在整個注浆过程中浆液流型保持不变;
- (4) 不考虑地下水的稀释作用,且注浆过程中不存在浆液堵管现象;
- (5) 浆液速度损失不计,且浆液沿纵向均匀分布;
- (6) 在一定厚度内,浆液在地层中只进行柱面渗透扩散。

## 2 浆液渗透的力学模型

本文中假定浆液为宾汉姆流体,该流体具备典型的塑性特征,比牛顿流体具有较高的流动阻力,只有当外部施加的剪切力足以克服流体内在的静切力时,浆液才表现出流动现象。宾汉姆流体的流变方程为<sup>[8,12-13]</sup>

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma, \quad (1)$$

式中: $\tau_0$ 为静切力,Pa; $\mu_p$ 为塑性粘度,Pa·s; $\gamma$ 为剪切速率,1/s。

$$\gamma = du/dr,$$

式中: $u$ 为浆液流速,m/s; $r$ 为流体柱半径,m。

### 2.1 浆液在单个毛细管中的渗流运动

参考文献[14],设毛细管(圆管)半径为 $r_0$ ,在管内取一段以管轴为对称轴的流体柱,流体力学模型见图1( $r_1$ 和 $v_1$ 分别为相对于邻层流体处于静止的流体距离管轴线的距离和速度, $p$ 为毛细管中的注浆压力, $l$ 为浆液扩散半径)。

根据文献[15],在不考虑重力的情况下,单个毛细管宾汉姆流体的启动压力梯度 $\lambda$ 满足:

$$\lambda = -\frac{dp}{dl} = \frac{2\tau_0}{r_0}. \quad (2)$$

### 2.2 浆液在地层中的渗流运动

将盾尾渗透注浆过程视为土体中存在大量管径不均的毛细管,而且越靠近管片,毛细管径越粗。

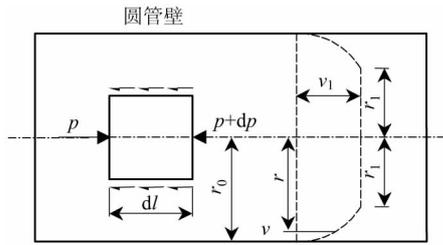


图1 浆液在单个毛细管中的流动  
Fig.1 Sketch of grout transusion in a capillary

地层模型见图2.图2中,  $D$  为盾尾建筑间隙影响厚度,即浆液扩散体的厚度,  $D = kd$ ,其中  $k$  为注入率,  $d$  为建筑间隙厚度<sup>[5]</sup>;  $l$  为浆液扩散半径;  $l_0$  为注浆孔半径.

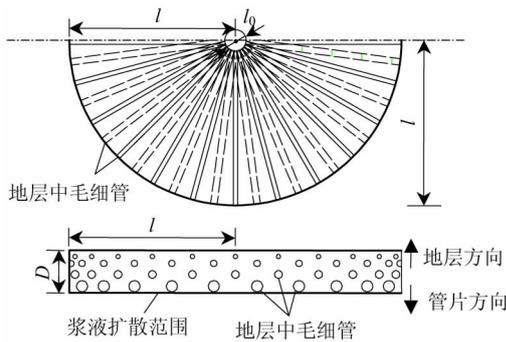


图2 浆液在地层中的流动  
Fig.2 Sketch of grout transusion in strata

参考不均匀毛细管组模型<sup>[15]</sup>,可以得到平均地层渗流速度

$$\bar{v} = \frac{1}{8\mu_p} \frac{\sum_{i=1}^N N_i r_i^4}{\sum_{i=1}^N N_i r_i^2} \left( -\frac{dp}{dl} \right) \times \left[ 1 - \frac{-4dl}{3dp} \left( \frac{2\tau_0}{\bar{r}_0} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{-2\tau_0}{\bar{r}_0} \frac{dl}{dp} \right)^4 \right], \quad (3)$$

式中:  $N_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 为浆液渗透扩散锋面上半径为  $r_i$  毛细管的数目;  $\bar{r}_0$  为毛细管的平均半径.

令  $\bar{v} = 0$ , 可得平均启动压力梯度

$$\bar{\lambda} = \left| -\frac{dp}{dl} \right| = \frac{2\tau_0}{\bar{r}_0}. \quad (4)$$

将  $\lambda = 2\tau_0/\bar{r}_0$  代入流量公式  $q = vA$ , 则浆液扩散锋面上毛细管的总面积  $A = \pi \sum N_i r_i^2$ , 从而可得通过浆液扩散锋面的总流量

$$q = \frac{\pi}{8\mu_p} \sum_{i=1}^N N_i r_i^4 \left( -\frac{dp}{dl} \right) \times \left[ 1 - \frac{-4\lambda dl}{3dp} + \frac{1}{3} \left( -\lambda \frac{dl}{dp} \right)^4 \right]. \quad (5)$$

### 2.3 盾尾注浆渗透过程分析

盾构隧道在进行盾尾同步注浆过程中,浆液的渗透扩散模型见图3,图中  $p_g$  为注浆压力,  $p_w$  为地下水压力.

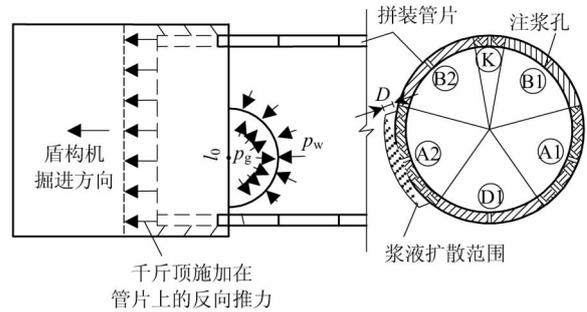


图3 盾尾注浆渗透扩散过程  
Fig.3 Diffusion process of backfill grouting

在盾尾注浆过程中,注入的总注浆量

$$Q = qt, \quad (6)$$

式中  $t$  为注浆时间.

流体在地层中的渗透过程可以看作是在多孔介质中的流动,满足 Dupuit-Forchheimer 关系式<sup>[15]</sup>:

$$v' = n\bar{v}, \quad (7)$$

式中:  $v'$  为浆液渗流速度;  $n$  为初始孔隙率.

考虑到管片脱离盾尾后,由于盾尾间隙的存在,管片周围土体将向盾尾间隙移动,由此导致土体松散,实际孔隙率大于土体初始孔隙率<sup>[2,5]</sup>.为考虑盾尾间隙的影响,引入等效孔隙率  $n'$  代替初始孔隙率  $n$ :

$$n' = n + \frac{1-n}{k}, \quad (8)$$

式中:  $k$  为浆液注入率.

将  $n'$  替换式(7)中的  $n$ , 可将  $v'$  表示为

$$v' = n'\bar{v} = \left( n + \frac{1-n}{k} \right) \bar{v}. \quad (9)$$

从宏观角度来看,盾尾注浆的渗透过程,满足 H Darcy 定律:

$$v' = -K_p \frac{dh}{dl} = -K_p \frac{dp}{\rho g dl}, \quad (10)$$

式中:  $K_p$  为宾汉姆流体通过多孔介质的有效渗透率;  $\rho$  为密度;  $g$  为重力加速度.

根据文献[15],

$$K_p = \frac{n'}{8} \frac{\sum N_i r_i^4}{\sum N_i r_i^2} = \frac{1}{8} \left( n + \frac{1-n}{k} \right) \frac{\sum N_i r_i^4}{\sum N_i r_i^2}. \quad (11)$$

将式(9)~(11)代入式(3),并考虑到盾尾注

浆开始时,注浆压力梯度远大于启动压力梯度,即  $-dp/dl \gg \lambda$ , 可得

$$\lambda = -\frac{3(\rho g - \mu_p)}{4\rho g} \frac{dp}{dl}. \quad (12)$$

由盾构隧道盾尾注浆时,浆液的柱面扩散特性可得

$$n' = \frac{\pi \sum_{i=1}^N N_i r_i^2}{\pi l D}. \quad (13)$$

将式(13)代入式(8),可得浆液扩散半径  $l$  与毛细管半径  $r_i$  和毛细管数量  $N_i$  的关系式:

$$l = \frac{\sum_{i=1}^N N_i r_i^2}{D \left[ n + \frac{1-n}{k} \right]}. \quad (14)$$

由式(14)可知,当盾尾建筑间隙影响厚度和土体等效孔隙率不变时,浆液扩散半径与浆液流动锋面上毛细管总面积成正比.将  $Q = \pi l^2 k d n' / 2$  和式(14)代入式(6),并考虑到盾尾注浆开始时,注浆压力梯度远大于启动压力梯度,即  $-dp/dl \gg \lambda$ , 可得

$$\frac{\sum_{i=1}^N N_i r_i^4}{\sum_{i=1}^N N_i r_i^2} \left( -\frac{dp}{dl} \right) \left( 1 - \frac{4\lambda}{3} \frac{dl}{dp} \right) = \frac{4l\mu_p}{t}. \quad (15)$$

将式(11)、(12)代入式(15),可得

$$dp = -\frac{\rho g n'}{2tK_p} dl. \quad (16)$$

由边界条件  $l = l_0$   $p = p_g$ , 得浆液扩散半径  $l$  处的注浆压力

$$p_l = p_g - \frac{\rho g n'}{4tK_p} (l^2 - l_0^2), \quad (17)$$

则管片所受浆液总压力

$$F_g = \int_0^l \frac{2\pi l p_l}{2} dl. \quad (18)$$

积分,得

$$F_g = \frac{\pi p_g l^2}{2} - \frac{\pi \rho g n'}{16tK_p} (l^4 - 2l^2 l_0^2). \quad (19)$$

注浆压力对单位面积管片产生的压力

$$P_g = \frac{2F_g}{\pi l^2} = p_g - \frac{\rho g n'}{8tK_p} (l^2 - 2l_0^2). \quad (20)$$

在浆液扩散半径的锋面上,注浆压力  $p_l$  等于注浆处地下水压力  $p_w$ , 则由式(17)可得浆液扩散半径

$$l = \sqrt{4tK_p \frac{p_g - p_w}{\rho g n'} + l_0^2}. \quad (21)$$

## 2.4 公式的应用范围

宾汉姆流体的壁后注浆渗透机理,是在假定浆液运动为恒定层流的基础上导出的,并不适用于浆液紊流的情形.浆液在流动过程中,流体属于层流还是紊流,可根据流体的雷诺数  $Re$  确定:  $Re < 2000$  时为层流,  $Re > 4000$  时为紊流,  $2000 < Re < 4000$  时为层流和紊流的混合流.

$$Re = \frac{\bar{v}d}{\mu_p}, \quad (22)$$

式中:  $\bar{v}$  为流体的平均速度;  $d$  为流体通过的孔隙尺寸;  $\mu_p$  为流体塑性粘度.

## 3 算例分析

根据上述推导结果,在选取相应计算参数的基础上,分别就注浆压力和注浆时间对浆液扩散半径、管片所受浆液总压力及单位面积管片所受浆液压力的影响进行计算分析.

### 3.1 参数选取

假定地下水压力  $p_w = 0$ , 注浆管半径  $l_0 = 2.5$  cm, 浆液注入率  $k = 1.5$ , 土体初始孔隙率  $n = 20\%$ , 土体渗透率  $K_w = 5 \times 10^{-4}$  cm/s, 盾尾建筑间隙影响厚度  $D = 10$  cm.

通过引入等效孔隙率  $n'$ , 并根据孔隙率  $n$  与孔隙比  $e$  的关系式  $e = n / (1 - n)$ , 可得土体等效孔隙比  $e' = 2.75$ . 在此基础上,参考土体孔隙比渗透率的经验公式<sup>[5]</sup>, 可得土体等效渗透率  $K_w' = K_w (e'/e)^2 = 6.05 \times 10^{-2}$  cm/s.

浆液在地层中的等效渗透率

$$K_p' = \frac{K_w'}{\beta}, \quad (23)$$

式中:  $K_w'$  为水在地层中的等效渗透率;  $\beta$  为浆液粘度  $\mu_g$  与水的粘度  $\mu_w$  之比.

取  $\beta = 4$ , 可得浆液在地层中的等效渗透率  $K_p' = 1.5125 \times 10^{-2}$  cm/s.

### 3.2 注浆压力的影响

由文献[3],注浆压力一般为  $0.2 \sim 0.4$  MPa, 为保守起见,取注浆压力范围为  $0.1 \sim 0.6$  MPa(级差为  $0.05$  MPa). 注浆时间  $t = 30$  min, 将上述参数分别代入式(19)~(21), 可得注浆压力不同时浆液扩散半径、管片所受浆液总压力、单位面积管片所受浆液压力, 结果见表1.

表1 不同注浆压力下管片所受压力和浆液扩散半径  
Tab.1 Pressure on segments and grout diffusion radius vs. grouting pressure

注浆压力/MPa	浆液扩散半径/cm	管片所受浆液总压力/kN	单位面积管片所受浆液压力/MPa
0.10	38.62	23.41	0.100 00
0.15	47.26	52.60	0.149 99
0.20	54.56	93.45	0.199 99
0.25	60.98	145.96	0.249 99
0.30	66.79	210.12	0.299 99
0.35	72.14	285.94	0.349 98
0.40	77.11	373.42	0.399 98
0.45	81.79	472.56	0.449 98
0.50	86.21	583.35	0.499 98
0.55	90.41	705.80	0.549 97
0.60	94.43	839.91	0.599 97

浆液的扩散半径、管片所受浆液总压力及单位面积管片所受的浆液压力随注浆压力的变化分别见图4~6.

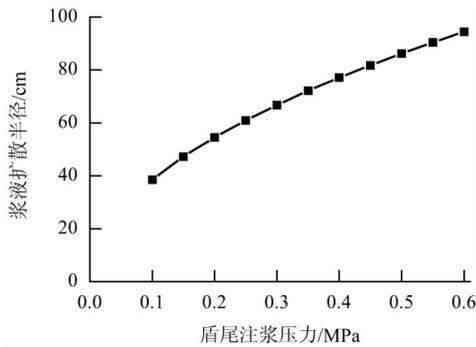


图4 不同注浆压力下的浆液扩散半径  
Fig.4 Grout diffusion radius vs. grouting pressure

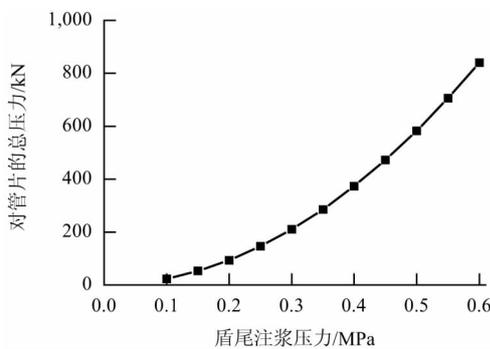


图5 不同注浆压力下管片所受浆液总压力  
Fig.5 Total pressure on segments vs. grouting pressure

可见,在其他条件相同的情况下,浆液扩散半径、管片所受浆液总压力及单位面积管片所受浆液压力均随注浆压力的增大而增大;扩散半径增大速度随注浆压力的增大逐渐减小;管片所受浆液总压

力的增大速度随注浆压力的增大而逐渐增大;单位面积管片所受浆液压力的增长速率基本保持不变.

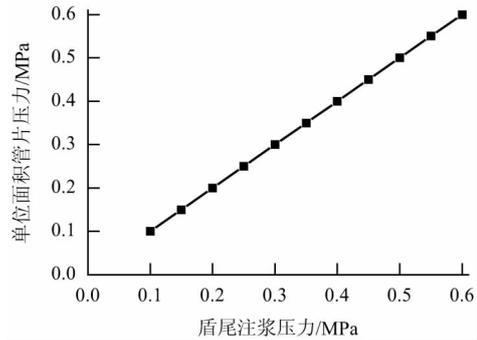


图6 不同注浆压力下单位面积管片所受浆液压力  
Fig.6 Pressure on unit segment vs. grouting pressure

### 3.3 注浆时间的影响

上述计算参数不变,注浆压力为0.3 MPa,改变注浆时间(10, 20, …, 90 min)时,浆液扩散半径、管片所受总压力及单位面积管片所受压力见表2.

表2 不同注浆时间管片所受压力和浆液扩散半径  
Tab.2 Pressure on segments and grout diffusion radius vs. grouting time

注浆时间/min	浆液扩散半径/cm	管片所受浆液总压力/kN	单位面积管片所受浆液压力/MPa
10	38.62	70.24	0.299 99
20	54.56	140.18	0.299 99
30	66.79	210.12	0.299 99
40	77.11	280.07	0.299 99
50	86.21	350.01	0.299 99
60	94.43	419.95	0.299 99
70	101.99	489.90	0.299 99
80	109.03	559.84	0.299 99
90	115.64	629.78	0.299 99

浆液扩散半径和管片所受浆液总压力随注浆时间的变化分别见图7和图8.

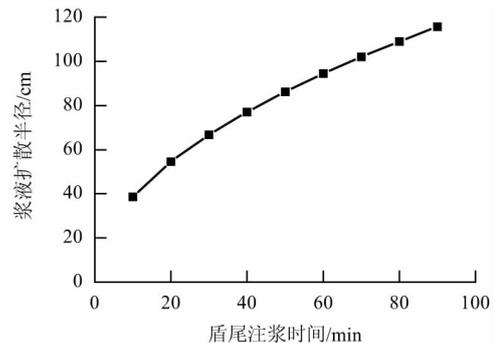


图7 不同注浆时间的浆液扩散半径  
Fig.7 Grout diffusion radius vs. grouting time

可见,其他条件相同时,浆液扩散半径和管片所受浆液总压力均随注浆时间的延长而增大,前者的增大速度随时间推移不断减小,后者的增大速度保持不变;单位面积管片所受浆液压力不随注浆时间变化(表2)。

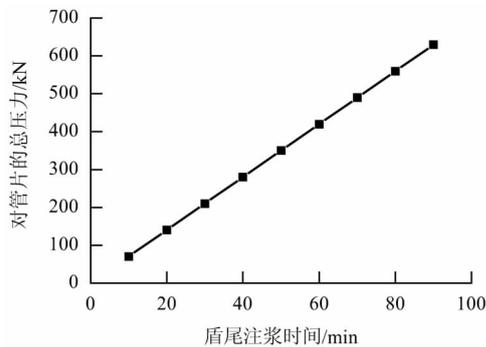


图8 不同注浆时间管片所受浆液总压力

Fig. 8 Total pressure on segments vs. grouting time

## 4 结论

(1) 其他注浆参数相同时,在不同注浆时间和注浆压力条件下,浆液对管片产生的压力的增大速率大于浆液扩散半径的增大速率。

(2) 当盾尾建筑间隙影响厚度和土体等效孔隙率不变时,浆液扩散半径与浆液流动锋面上毛细管总面积成正比。

(3) 推导得到的渗透扩散过程能在一定程度上模拟浆液在地层中的渗透过程,并反映注浆对管片的影响。但由于多孔介质在地层中的流动,浆液渗透率随迂曲度和比面的增大而减小,因此,得到的力学模型只是一个简化模型,需进一步考虑两者对于浆液渗透的影响。

### 参考文献:

[1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 21-22.

[2] 叶飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.

[3] 梁精华. 盾构隧道壁后注浆材料配比优化及浆体变形特性研究[D]. 南京: 河海大学土木与交通学院, 2006.

[4] YUKINORI K, YUTAKA S, NORIYUKI O, et al. Back-fill grouting model test for shield tunnel[J]. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 1998, 39(1): 35-39.

[5] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5):

1307-1312.

YE Fei, ZHU Hehua, HE Chuan. Back-filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1307-1312.

[6] 李志明, 廖少明, 戴志仁. 盾构同步注浆填充机理及压力分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1752-1757.

LI Zhiming, LIAO Shaoming, DAI Zhiren. Study on synchronous grouting filling patterns and pressure distribution of EPB shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1752-1757.

[7] 韩月旺, 梁精华, 袁小会. 盾构隧道壁后注浆体变形模型及土体位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊2): 3646-3652.

HAN Yuewang, LIANG Jinghua, YUAN Xiaohui. Deformation model of backfill grouting and ground movement analysis of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup. 2): 3646-3652.

[8] 袁小会, 韩月旺, 钟小春. 盾构隧道壁后注浆压力分布模型[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 18-25.

YUAN Xiaohui, HAN Yuewang, ZHONG Xiaochun. Pressure distribution model of simultaneous backfill grouting of shield tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 18-25.

[9] 范昭平, 韩月旺, 方忠强. 盾构壁后注浆压力分布计算模型[J]. 公路交通科技, 2011(3): 95-100.

FAN Zhaoping, HAN Yuewang, FANG Zhongqiang. Calculating model of backfill grouting pressure distribution for shield tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011(3): 95-100.

[10] 黄宏伟, 刘通剑, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆效果的雷达探测研究[J]. 岩土力学, 2003, 14(增刊): 353-356.

HUANG Hongwei, LIU Yujian, XIE Xiong Yao. Application of GPR to grouting distribution behind segment in shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 14(Sup.): 353-356.

[11] 邓宗伟, 冷伍明, 陈建平. 盾构隧道壁后注浆作用机制的计算研究[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6): 114-117.

DENG Zongwei, LENG Wuming, CHEN Jianping. The calculating research on the mechanism of shield tunnel back filled grouting[J]. Journal of Plasticity

- Engineering, 2005, 12(6): 114-117.
- [12] 岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 49-51.
- [13] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究及应用[J]. 水利学报, 2004, 35(6): 75-79.  
YANG Xiuzhu, WANG Xinghua, LEI Jinsha. Study on grouting diffusion radius of Bingham fluids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(6): 75-79.
- [14] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 基于考虑时变性的宾汉姆流体的渗透注浆机理研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(增刊1): 67-72.  
YANG Zhiquan, HOU Kepeng, GUO Tingting, et al. Study on penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(Sup.1): 67-72.
- [15] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 534-537.
- (中、英文编辑: 付国彬)

(上接第427页)

- [8] 郭小红, 陈卫忠, 曹俊杰. 跨海峡隧道风化槽围岩衬砌防排水技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1481-1488.  
GUO Xiaohong, CHEN Weizhong, CAO Junjie. Waterproof and drainage technologies for lining of subsea tunnel in weathered trough[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1481-1488.
- [9] BILOTTA E. Centrifuge modeling of tunnelling close to a diaphragm wall[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2005, 5(1): 27-41.
- [10] BILOTTA E. Diaphragm walls to mitigate ground movements induced by tunnelling: experimental and numerical analysis[D]. Naples: Department of Geotechnical Engineering, University of Naples Federico II, 2004.
- [11] GRANT R J. Movements around a tunnel in 2-layer ground[D]. London: School of Engineering and Mathematical Sciences, City University, 1998.
- [12] KIMURA T, MAIR R J. Centrifugal testing of model tunnels in soft clay[C]//Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema, 1981: 319-322.
- [13] GORASIA R J, MCNAMARA A M. High shear capacity ribbed piles[C]//Proceedings of 2nd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Ghent: Ghent University, 2012: 1-10.
- [14] DAVIS E H, GUNN M J, MAIR R J, et al. The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material[J]. Geotechnique, 1980, 30(4): 397-416.
- [15] MAIR R J, TAYLOR R N. Bored tunnelling in the urban environment [C]//Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 2353-2385.
- (中、英文编辑: 付国彬)